

多角形構造による環状抑制形ネットワークの同期現象

正地 裕貴[†] 上手 洋子[†] 西尾 芳文[†]

[†] 徳島大学工学部 〒770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1

E-mail: †{shoji,uwate,nishio}@ee.tokushima-u.ac.jp

あらまし 近年, ニューラル振動子 (Neural Oscillator) や環状抑制形ネットワーク (Ring Inhibitory Neural Network) などのニューラルネットワークによる発振モデルが提案されている. 特に, 環状抑制形ネットワークは単純な構造で振動現象が観測可能である. 発振ニューラルネットワークは結合方法によって発振が変化する. 本論文では, 環状抑制形ネットワークを構成するニューロンの入出力に着目し, 多角形構造を用いた環状抑制形ネットワークについて述べる. さらに, 提案モデルにおける発振の特徴および発振条件についての考察を行う.

キーワード 発振ニューラルネットワーク, 環状抑制形ネットワーク, 同期現象

Synchronization of Ring Inhibitory Neural Network with Polygonal Structure

Yuki SHOJI[†], Yoko UWATE[†], and Yoshifumi NISHIO[†]

[†] Electrical and Electronic Engineering, Tokushima University
2-1, Minami Josanjima, Tokushima, 770-8506 Japan

E-mail: †{shoji,uwate,nishio}@ee.tokushima-u.ac.jp

Abstract Some oscillation models of neural network were proposed in late years (ex. neural oscillator, ring inhibitory neural network, etc). In particular, the ring inhibitory neural network has simple structure to observe an oscillation phenomenon. This model changes the oscillation by combined methods. In this paper, we focus on the input and output of neurons composed network and it is showed that the oscillation of the ring inhibitory neural network. In addition, we consider characteristic and terms of this model.

Key words neural oscillator, ring inhibitory neural network, synchronization

1. ま え が き

ニューラルネットワークによって構成される発振回路についての研究は古くから多数の研究がなされており, パターン分類問題や生物の歩行モデルに応用されている [1]-[5]. 振動をもたらす神経回路は無数にあるが, その中でも代表的なモデルとしてニューラル振動子と環状抑制形ネットワークというものが挙げられる [6][7]. まず, ニューロンは単一の状態では基本的に発振が生じない. この状態で振動を観測するには, 疲労などを考慮しなくてはならない. ここで, ニューラル振動子と呼ばれる発振回路がある. このニューラル振動子は, 興奮性と抑制性のニューロンの相互結合と自己結合によって構成される発振モデルである. また, このニューラル振動子の中でも 2 個のニューロンで構成され一方の自己結合の重みを $W = 0$ としたモデルは, 最も簡単な振動系として挙げられることがある. しかし, 以上のニューラル振動子にあるような自己刺激系の結合による

振動現象はまれであるといわれている [6][8].

そこで, その他の簡単な構造を持つ発振モデルとして環状抑制形ネットワークが挙げられる. この環状抑制形ネットワークは, 複数 (3 個以上) の抑制性ニューロンを用いて構成される. これらのニューロンを一方向に環状に結合することで, 比較的単純な構成で発振現象を観測することができる [6]. また, 環状抑制形ネットワークは運動リズム発生モデルとしてよく用いられる発振回路でもある.

これらのニューラルネットワークによる発振回路は, ニューロン間の結合方法により特徴的な発振を示すことがある. この結合方法に関しては, 系の対称性による発振の変化がみられることが報告されている [9]. そこで本研究では, 環状抑制形ネットワークを構成する入出力数に着目し, これを基礎とした多角形構造の発振ネットワークを提案する. 多角形構造で発振ネットワークを構築することにより, 本来の特徴である簡単な構造を持ちつつ複雑な発振を得ることができる. また, この多角形

構造によって得られる発振について検討し、発振条件についての考察を行う。まず、一般的な環状抑制形ネットワークの特性と観測できる発振現象について述べる。次に、環状抑制形ネットワークのモデル、発振及びそれぞれのモデルに関する特徴についての考察を行う。

2. 環状抑制形ネットワーク

2 個のニューロンにより構成されるニューラル振動子モデルを図 1 に示す。上で述べた最も簡単な振動系は、このモデルにて一方の自己結合の重みを $W = 0$ としたものである。本研究では、環状抑制形ネットワークについて取り扱う。 m 個のニューロンより構成される環状抑制形発振モデルを図 2 に示す。この環状抑制形ネットワークの特徴の 1 つとして、ニューラル振動子とは異なり自己結合を持たないことが挙げられる。また、ニューロンが一方方向性に抑制性結合されていることも挙げられる。 m 個のニューロンにより構成された環状抑制形ネットワークでは、 N_1 の出力が N_2 へ、 N_2 の出力が N_3 へと刺激を与える [10]。このように結合されたニューロン同士が刺激を与え続け、最終的に N_m の出力が N_1 へと刺激を与える。これらの刺激により振動現象を得ることができる。ここで、環状抑制形ネットワークが発振を示すにはいくつかの条件が存在する。まず、上でも述べたようにこれらのニューロンはすべて抑制形であり、結合荷重 W_{mn} が負の値をとる必要がある。そして、構成するニューロンの個数が偶数の場合では発振現象が起きず、 $m = 1$ を除く奇数の場合のみに発振を観測することができる [11]。

本研究で取り扱うモデルは連続時間モデルとする。この時の系における回路方程式は式 (1) のように表すことができる。ここでの出力方程式は、式 (2) で表されるシグモイド関数とする。振動の周期は主として時定数 で決定される。

$$\frac{dx_i}{dt} = -x_i + \sum_{j=1}^m w_{ij} f(x_j) \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

また、環状抑制形ネットワークは、 m 個のニューロンによって循環回路が構成されていると m 相波形を発振する特徴を持つ。例として、 $m = 3$ の場合における環状抑制形ネットワークのネットワークモデルを図 3(a) に、この場合の系全体における発振を図 3(b) に示す。このとき、結合荷重 $W = -25.0$ にてニューロン同士が結合されているとする。図 3(b) より、3 個のニューロンによって環状神経回路が構築されている場合には三相正弦波を発振していることがわかる。循環回路の細胞数を $m = 5$ や $m = 7$ とした場合には、五相正弦波や七相正弦波を観測することができる。本研究では、この 3 個のニューロンにより構成される三相正弦波を発振するモデルに着目した。これを基礎とした多角形構造による環状抑制形ネットワークの構築を行い、これら多角形構造モデルの発振について述べる。

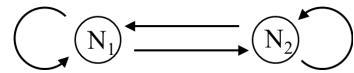


図 1 2 細胞の発振回路。

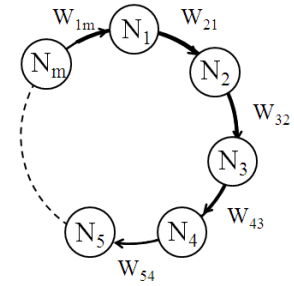
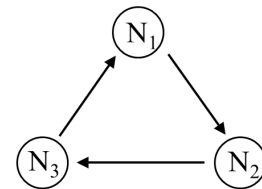
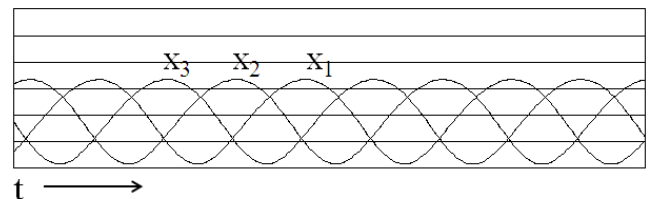


図 2 環状ニューラルネットワーク。



(a) モデル図。



(b) 系全体の発振。

図 3 $m=3$ におけるネットワークモデル。

3. シミュレーション結果

図 4 にシミュレーションを行ったネットワークモデルを示す。本研究では、ニューロン数を $m = 4, 5, 6, 7, 9$ として多角形構造の構築を行った。また、図 4(f) には発振現象が確認できず発散となった $m = 9$ モデルを示す。これらのモデルは、結合荷重 $W = -25.0$ にてニューロン同士を結合してシミュレーションを行った。

まず、図 4(a) に示したニューロン数 $m = 4$ とした場合の多角形構造モデルについて述べる。このモデルにて観測された発振を図 5 に示す。図 5 より、 $m = 4$ としたときの発振では N_1 と N_4 において出力波形が等しく、 N_2 および N_3 はそれぞれ独立した波形を出力した。これより、系全体の発振は三相となっている。この系において、発振の形状が等しい N_1 と N_4 は共に入力数 1, 出力数 1 となっていることが確認できる。

図 4(b) に示したニューロン数 $m = 5$ とした場合の多角形構造モデルについて述べる。このモデルにて観測された発振を図 6 に示す。図 6 より、 $m = 5$ としたときの発振では N_1 と N_5 ,

N_2 と N_3 において出力波形が等しく N_4 は独立した波形を出力した．これより，系全体の発振は三相となっている．この系において，発振の形状が等しい N_1 と N_5 は共に入力数 1，出力数 2 であり N_2 と N_3 は入力数 2，出力数 1 となっていることが確認できる．また，一つだけ異なる発振を示した N_4 のみ入力数 2，出力数 2 である．

図 4(c) に示したニューロン数 $m = 6$ とした場合の多角形構造モデルについて述べる．このモデルにて観測された発振を図 7 に示す．この場合， N_1 と N_5 ， N_2 と N_6 ， N_3 と N_4 の発振が同じ形となり三相発振が確認できる．この系では $m = 4$ や $m = 5$ とは異なりどのニューロンに関しても入力数 2，出力数 2 となっている．また，他の系では各ニューロンの出力に振幅の差が存在するのにに対し，このモデルにおいては振幅が等しい発振を示した．

図 4(d) に示したニューロン数 $m = 7$ 多角形構造モデルについて述べる．このモデルでの観測波形を図 8 に示す．図 4(d) の発振モデルでは N_1 と N_5 と N_6 ， N_2 と N_3 と N_7 が出力する波形が等しい．ここで， N_4 のニューロンによる発振は独立している．これらより系全体の発振は三相となっている．また，発振の形状が等しい N_1 と N_5 と N_6 は共に入力数 1，出力数 2 であり， N_2 と N_3 と N_7 は入力数 2，出力数 1 となっている．そして N_4 は入力数 3，出力数 3 と結合数が多くなっている．

図 4(e) に示したニューロン数 $m = 9$ とした場合の多角形構造モデルについて述べる．また， $m = 9$ での多角形構造モデルにて観測されたそれぞれのニューロンにおける発振を図 9(a) に，系全体における発振を図 9(b) に示す．図 9 の発振モデルでは，上記にある回路のように同じ発振を起こすニューロンが存在せず九相発振となっている．この系において， N_1 ， N_2 ， N_3 ， N_7 ， N_8 および N_9 はすべて入力数 2，出力数 2 である．しかし， $m = 4, 5, 6, 7$ のように同じ入力数，出力数を持つニューロン同士で同じ形状の発振を示すことはなかった．また，図 4(f) に示した結合方法では $m = 9$ であっても発振を確認出来なかった．

以上より，本実験でシミュレーションを行った多角形構造環状抑制ネットワークは，三種類に分類することができる．まず， $m = 4, 5, 7$ モデルに関しては同形状の波形を示すニューロン同士では入出力数が等しいという特徴がある．次に， $m = 6$ モデルでは上記に加えて三相正弦波を発振する特徴を持つ．このモデルに関しては，すべてのニューロンの入出力数が等しい値を持つ．最後に， $m = 9$ では同入出力数を持つニューロンであったとしても位相同期を行わなかった．また，発振が m 相となる場合もこのモデルのみとなった．以上より， $m = 9$ モデルに関しては他の多角形構造ネットワークとは異なる発振とであることがわかる．以上より， $m = 9$ モデルを除く多角形構造モデルでは，周辺の細胞との結合数によって波形が変化していることがわかる．

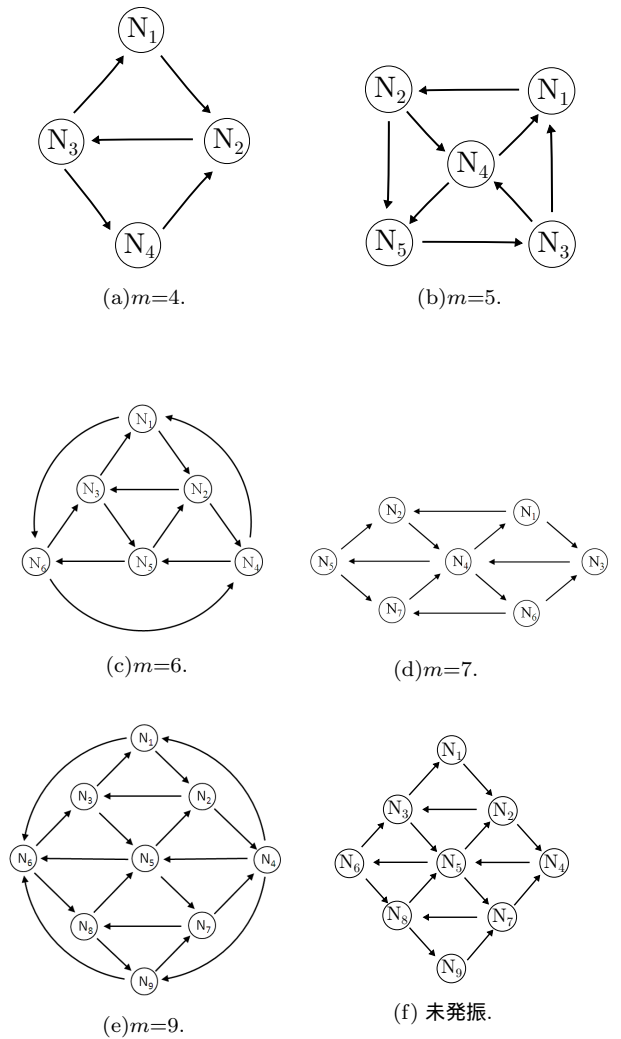


図 4 ネットワークモデル．

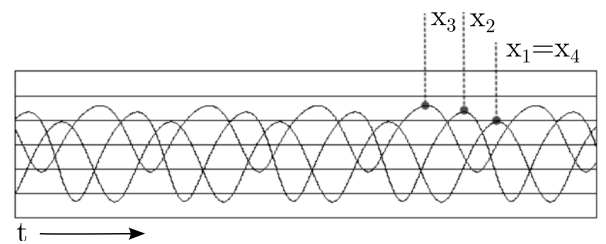


図 5 $m=4$ における多角形構造モデル．

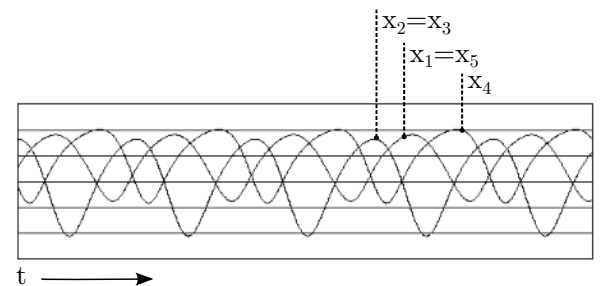


図 6 $m=5$ における多角形構造モデル．

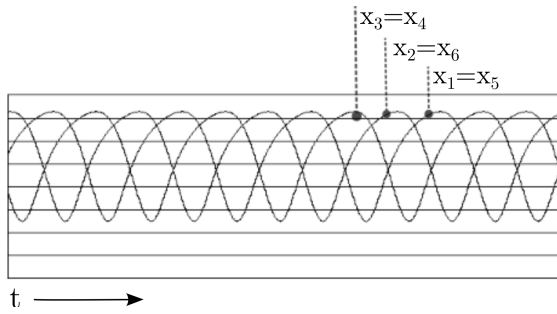


図 7 $m=6$ における多角形構造モデル.

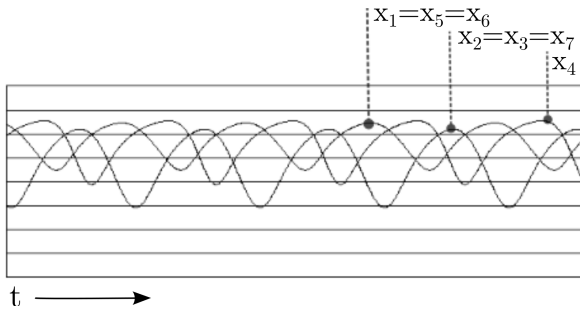
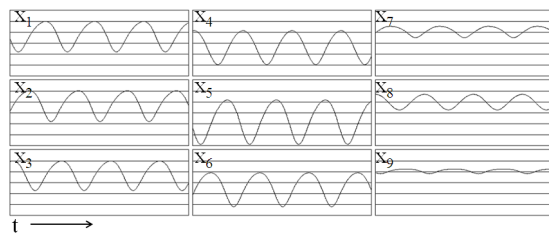
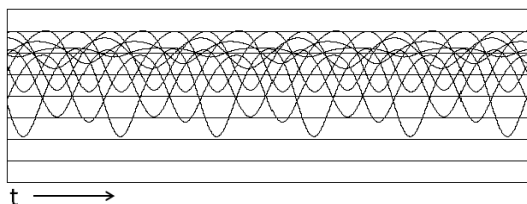


図 8 $m=7$ における多角形構造モデル.



(a) 各ニューロンごとの発振.



(b) 系全体の発振.

図 9 $m=9$ における多角形構造モデル.

4. ま と め

発振ニューラルネットワークでは、ニューロン間の結合方法により特徴のある発振を得ることが可能である。本研究では、環状抑制形ネットワークを構成するニューロンの入出力数に着目し、多角形構造の発振ネットワークについてシミュレーションを行った。本実験では、 $m = 3$ 環状抑制形ネットワークを基礎とした多角形構造を提案し、周辺の細胞との入出力数により発振される波形の形状や相が変化することを確認した。そして、これらの発振は以下の3つに分類することができる。まず、 $m = 4, 5, 6, 7$ に挙げられる多角形構造モデルは基礎となる $m = 3$ 発振モデルと同様に、三相の波形を発振した。このとき、

入力数と出力数が同じニューロン同士では等しい形状の発振である特徴が確認できた。また、この中でも、すべてのニューロンで入出力数が同じ $m = 6$ モデルでは三相正弦波を発振するという結果となった。これらに対して、 $m = 9$ モデルのみそれぞれ波形の形状が異なる九相発振を示した。これに加え、入出力数が等しいニューロン同士でも波形の形状は異なる結果となった。この現象の条件について本研究では明確に解明ができていない。今後の展望として、 $m = 9$ を例とした構造による発振についての法則性に関してさらなる考察を行うことが挙げられる。また、今回の研究では $m = 3$ を基本として構築を行ったが、 $m = 5$ を基本とした構造やこれらを組み合わせた構造、ニューロンの構造を立体とした環状抑制形ネットワークでの発振現象についても検証を行いたい。

文 献

- [1] 黒川弘章, 何俊英, 森真作, "局所結合型発振器ネットワークを用いたパターン分離問題の解法", 電子情報通信学会技術研究報告. NLP, 非線形問題 96(509), 71-78, 1997
- [2] DeLiang Wang, "Emergent Synchrony in Locally Coupled Neural Oscillators", IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.6, No.4, 1995
- [3] Susanne Still, Gwendal Le Masson, "Traveling Waves in a Ring of Three Inhibitory Coupled Model Neurons", IEEE Int. Conf. on Neural Networks, San Francisco, U.S.A., March 28-April 1, 1993
- [4] Gen Endo, Jun Morimoto, Jun Nakanishi, Gordon Cheng, "An Empirical Exploration of a Neural Oscillator for Biped Locomotion Control", Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, Vol.3, 2004
- [5] G.Bard Ermentrout, Carson C. Chow, "Modeling neural oscillations", Physiol Behav. 2002 Dec;77(4-5):629-33., 2002
- [6] 甘利俊一, "神経回路網の数理", 1989
- [7] Yuichi Nakamura, Yoshihiro Nakano, Hiroshi Kawakami, "N-phase Oscillation of a Neural Oscillator Connected with Twisted Ring Structure", Electronics and Communications in Japan, Part 3, Vol.83, No.9, 2000
- [8] A.Tonnelier, S.Meignen, J.Demongeot, "Synchronization and desynchronization of neural oscillators", Neural Networks, Volume 12, Issue 9, November 1999, Pages 1213-1228
- [9] 中村悠一, 川上博, "対称性を持つニューラルネットワークの発振モードについて", 信学技報, NLP96-14, 1996
- [10] Yuichi Nakamura, Hiroshi Kawakami, "Hard Oscillation in Simple Neural Oscillator", 電子情報通信学会論文誌, A, Vol.J80-A, No12, pp2171-2172, December 1997
- [11] 北島博之, 川上博, "一方向性巡回結合発振器にみられる発振現象", 電子情報通信学会総合大会, pp.85, 1997